



# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМ РАЙОНИРОВАНИИ ТЕРРИТОРИЙ PREDICTION OF GEOLOGICAL ENGINEERING CONDITIONS BY SINKHOLE ZONING

**СЕРЕДИН В.В.**

Заведующий кафедрой инженерной геологии Пермского государственного университета, д.г.-м.н., профессор, nedra@nedra.perm.ru

**ГАЛКИН В.И.**

Заведующий кафедрой геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета, д.г.-м.н., профессор, Vgalkin@pstu.ru

**РАСТЕГАЕВ А.В.**

Профессор кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета, д.г.-м.н.

**ЛЕЙБОВИЧ Л.О.**

Директор департамента экологии научно-исследовательского, проектного и производственного предприятия по природоохранной деятельности «Недра», к.т.н., leibovich@nedra.perm.ru

**ПУШКАРЕВА М.В.**

Профессор кафедры охраны окружающей среды Пермского национального исследовательского политехнического университета, д.м.н., pushkareva@nedra.perm.ru

**SEREDIN V.V.**

The head of the department of geological engineering of Perm State University, doctor of geological-mineralogical sciences, professor, nedra@nedra.perm.ru

**GALKIN V.I.**

The head of the department of oil-and-gas geology of Perm National Research Polytechnic University, doctor of geological-mineralogical sciences, professor, Vgalkin@pstu.ru

**RASTYEGAEV A.V.**

A professor of the department of oil-and-gas geology of Perm National Research Polytechnic University, doctor of geological-mineralogical sciences

**LEIBOVICH L.O.**

The director of the ecology department of the Research, Design and Production Enterprise for Nature Conservation Activity «Nedra», candidate of technical sciences, leibovich@nedra.perm.ru

**PUSHKAREVA M.V.**

A professor of the department of environmental protection of Perm National Research Polytechnic University, doctor of medical sciences, pushkareva@nedra.perm.ru

**Ключевые слова:**

карстовая опасность; классификационный показатель; сульфатный карст; карстовая воронка; геологические признаки; карстологическое районирование; устойчивость территории; прогноз; плотность карстовой воронки; интенсивность образования карстовых провалов; категория устойчивости территории.

**Key words:**

karst hazard; classification index; sulfate karst; sinkhole; geological characteristics; sinkhole zoning; area stability; prediction; sinkhole density; sinkhole formation intensity; area stability category.

**Аннотация**

Разработан способ прогноза классификационного показателя карстовой опасности для точек опробования, в которых он не может быть получен экспериментальным путем. На одной из территорий Пермского края, где развит сульфатный карст, проведена апробация предложенного способа. Полученные результаты позволили выполнить прогноз значений плотности карстовых воронок, по которым была рассчитана интенсивность образования карстовых провалов и определена категория устойчивости исследуемой территории.

**Abstract**

A prediction method of the karst hazard classification index for investigation points where it can not be determined experimentally was developed. In a sulfate karst area in the Perm Region this method was tried out. The obtained results permitted to predict the sinkhole density values that were used for calculating the sinkhole formation intensity and determining the stability category of the investigated area.

**Введение**

Значительная часть территории РФ характеризуется распространением карстующихся пород. Присутствие их в геологическом разрезе вызывает дополнительные проблемы при освоении территорий, особенно при выборе мест под застройку, а также в значительной степени усложняет условия строительства и эксплуатации хозяйственных объектов. При принятии управленческих решений очень важно иметь информацию по карстовой опасности территории, которая может быть представлена в виде карт районирования. В настоящее время разработан ряд методов районирования [1–3], в которых предполагается, что информация по классификационному показателю карстовой опасности известна в каждой точке исследования. Однако это предположение не всегда реализуемо на практике, что значительно снижает надежность и достоверность карт районирования. Поэтому задачей данной работы является разработка метода прогноза классификационного показателя в тех точках, в которых он не был получен прямым (экспериментальным) путем.

**Методика выполнения прогноза классификационного показателя карстовой опасности**

Предлагаемая методика выполнения прогноза классификационного показателя карстовой опасности включает следующие *этапы*.

1. *Исследуемая территория разбивается на подобласти, в которых производятся исследования.*



При этом каждая подобласть должна иметь одинаковые площади ( $S_1 = S_2 = \dots = S_n$ ) и одинаковую плотность точек опробования ( $n_1 = n_2 = \dots = n_n$ ).

2. Производится группировка подобластей. В первую группу входят данные тех подобластей, в которых экспериментально определены классификационный показатель и геологические признаки. Во вторую — данные тех подобластей, в которых установлены только геологические признаки.

3. По экспериментальным данным первой группы строятся поля корреляции (диаграммы рассеивания) между классификационным показателем и каждым из геологических признаков, которые позволяют:

- произвести первичную оценку (выбраковку) тех геологических признаков, которые не оказывают влияния на формирование классификационного показателя;
- определить граничные значения, в пределах которых установлено влияние геологического признака на формирование классификационного показателя;
- сформировать на основании граничных значений геологических признаков выборочные совокупности, которые будут использоваться при дальнейших расчетах.

4. Рассчитываются коэффициенты парной корреляции ( $r$ ) между классификационным показателем и каждым из геологических признаков по ранее полученным выборкам. Расчетные коэффициенты корреляции ( $r_p$ ) сравниваются с табличными ( $r_m$ ). Те геологические признаки, которые имеют  $r_p < r_m$ , также исключаются (выбраковываются на втором шаге) из дальнейших исследований. После чего оставшиеся геологические признаки ранжируются по убыванию значений  $r_p$ . Чем меньше  $r_p$ , тем меньшее влияние оказывает этот геологический признак на формирование классификационного показателя.

5. Рассчитывается классификационный показатель по уравнению множественной регрессии, где в качестве факторных признаков выступают оставшиеся после отбраковки геологические признаки. В общем виде такое уравнение имеет следующий вид:

$$Y = A + K_1X_1 + K_2X_2 + K_3X_3 + \dots + K_nX_n, \quad (1)$$

где  $Y$  — классификационный показатель;  $A$  — свободный член;  $K_1, K_2, K_3, K_n$  — угловые коэффициенты;  $X_1, X_2, X_3, X_n$  — геологические признаки.

6. Проводится проверка адекватности полученной математической модели по критерию Стьюдента  $t$ .

7. Производится оценка классификационного признака в тех подобластях, где он не был получен экспериментальным методом.

### Апробация предложенного метода

Апробация предложенного метода производилась на территории Пермского края, где развит сульфатный карст. На исследуемой территории

общей площадью 7,5 км<sup>2</sup> планируется строительство промышленных и гражданских сооружений, поэтому для принятия оптимальных проектных решений необходима информация о карстовой опасности.

В качестве показателя, характеризующего карстовую опасность для сооружений, была принята интенсивность образования карстовых провалов:

$$\lambda = n / s \cdot t, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — среднегодовое количество карстовых провалов, отнесенное к единице площади (случай/км<sup>2</sup> · год);  $n$  — количество карстовых воронок на изучаемой площади;  $s$  — площадь закарстованной территории;  $t$  — длительность периода образования карстовых воронок.

Выбор этого показателя обусловлен тем, что наличие и величина карстовых воронок напрямую определяют устойчивость сооружения. Все остальные геологические признаки оказывают опосредованное влияние. Кроме того, этот критерий нормирован частью 2 СП 11-105-97 [4], определяет категорию устойчивости территории (табл. 1) и принят в качестве классификационного показателя при инженерно-геологическом районировании.

Анализ уравнения (2) показал, что при расчете интенсивности образования карстовых провалов наиболее трудоемким является процесс определения плотности карстовых воронок  $\rho$  (количества карстовых форм, в среднем приходящегося на единицу площади, случай/км<sup>2</sup>):

$$\rho = n / s. \quad (3)$$

### Результаты апробации предложенного метода и их обсуждение

Исследуемую территорию разбили на 30 подобластей, имеющих одинаковую площадь:  $S_1 = S_2 = \dots = S_{24} = 0,25$  км<sup>2</sup>. В пределах данной территории было пройдено 128 горных выработок, количество которых в различных подобластях варьировало от 3

Таблица 1

Категории устойчивости территорий относительно интенсивности провалообразования (среднегодового количества карстовых провалов на 1 км <sup>2</sup> )		
Категория устойчивости территории	Описание территории	Интенсивность провалообразования (случай/км <sup>2</sup> · год)
I	Очень неустойчивая	> 1,00
II	Неустойчивая	0,10–1,00
III	Недостаточно устойчивая	0,05–0,10
IV	Несколько пониженной устойчивости	0,01–0,05
V	Относительно устойчивая	< 0,01
VI	Устойчивая	Провалообразование исключается

до 8. Для выравнивания плотности точек исследования данные усреднялись, и в расчетах участвовали средние величины (т.е.  $n_1 = n_2 = \dots = n_{30} = 1$ ).

Для всех 30 подобластей имелась **информация по следующим геологическим признакам:**

1) для толщи карстующихся грунтов:

- глубина залегания кровли ( $H_k$ );
- глубина залегания подошвы ( $H_{к1}$ );
- мощность ( $M_k$ );
- абсолютная отметка кровли ( $AO_k$ );
- абсолютная отметка подошвы ( $AO_{к1}$ );

2) для зоны дробления:

- глубина залегания кровли ( $H_d$ );
- глубина залегания подошвы ( $H_{d1}$ );
- мощность ( $M_d$ );
- абсолютная отметка кровли ( $AO_d$ );
- абсолютная отметка подошвы ( $AO_{d1}$ );

3) для встреченного уровня четвертичного водоносного горизонта:

- глубина ( $H_b$ );
- абсолютная отметка ( $AO_b$ );

4) для установившегося уровня четвертичного водоносного горизонта:

- глубина ( $H_{b1}$ );
- абсолютная отметка ( $AO_{b1}$ );

5) для встреченного уровня иренского водоносного горизонта:

- глубина ( $H_i$ );
- абсолютная отметка ( $AO_i$ );

6) для установившегося уровня иренского водоносного горизонта:

- глубина ( $H_{i1}$ );
- абсолютная отметка ( $AO_{i1}$ );

7) минерализация вод ( $Min$ );

8) мощность аллювиальных отложений ( $M_{al}$ );

9) мощность неогеновых отложений ( $M_n$ );

10) для соликамских отложений:

- глубина ( $H_s$ );
- мощность ( $M_s$ ).

В 24 подобластях было задокументировано 1027 карстовых воронок, по которым был рассчитан показатель  $\rho$ . В 6 подобластях карстологические исследования не проводились. На основании полевых и лабораторных исследований была составлена таблица исходных данных, в которой по горизонтали представлены значения плотности карстовых воронок ( $\rho$ ) и геологических признаков, а по вертикали — номер подобласти. При этом вся первичная информация разделена на две группы. В первую группу вошли данные 24 подобластей, в которых определены  $\rho$  и геологические признаки. Во вторую — данные 6 подобластей, в которых установлены только геологические признаки. По данным первой группы построены **поля корреляции (диаграммы рассеивания) между  $\rho$  и каждым геологическим признаком**. Эти диаграммы позволяют решать, по крайней мере, **три задачи**. Рассмотрим их.

1. *Оценка (выбраковка) тех геологических признаков, которые не оказывают влияния на формирование плотности карстовых воронок  $\rho$* . Если между  $\rho$  и геологическим признаком наблюдается прямая или обратная зависимость, считаем, что

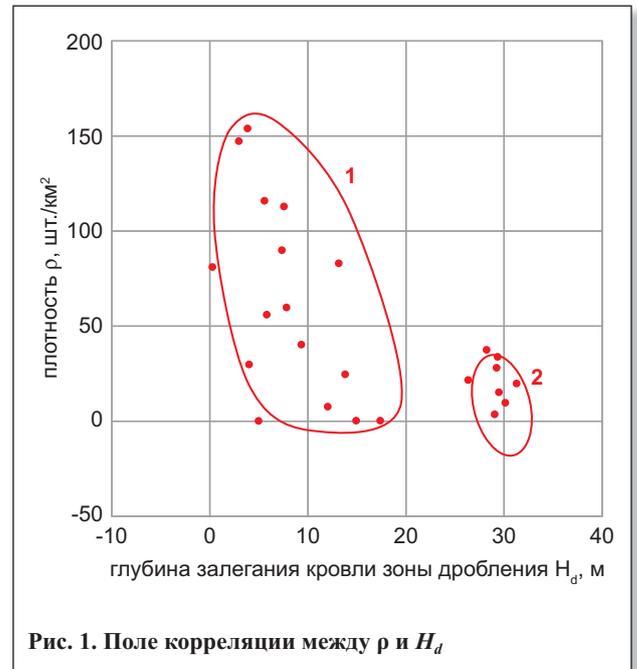


Рис. 1. Поле корреляции между  $\rho$  и  $H_d$

этот признак оказывает влияние на формирование карстовых воронок.

На рисунке 1 приведено поле корреляции между  $\rho$  и глубиной залегания кровли зоны дробления  $H_d$ . Из него видно, что с увеличением  $H_d$  (подполе 1) количество карстовых проявлений на земной поверхности уменьшается.

На рисунке 2 приведены поля корреляции между абсолютными отметками подошвы карстующихся грунтов  $AO_{к1}$  и показателем  $\rho$ . Из него видно, что взаимосвязи между исследуемыми признаками установить не удалось, поэтому определить влияние  $AO_{к1}$  на формирование  $\rho$  достаточно сложно.

На основании результатов использования данного подхода из дальнейших исследований были исключены следующие геологические признаки:  $AO_k$ ,  $AO_{к1}$ ,  $M_k$ ,  $AO_d$ ,  $AO_{d1}$ ,  $M_d$ ,  $H_b$ ,  $AO_b$ ,  $H_{i1}$ ,  $Min$ ,  $M_n$ ,  $H_s$ .

2. *Определение граничных значений, в пределах которых установлено влияние геологического признака на формирование плотности карстовых воронок  $\rho$* . В методическом плане решение этой задачи сводится к оценке распределения точек наблюдений, т.е. к оценке того, с чем мы будем работать — с одним геологическим телом или с несколькими (с одной генеральной совокупностью или с несколькими).

Из рисунка 1 видно, что в пределах поля корреляции между  $\rho$  и  $H_d$  выделяются два практически независимых друг от друга подполя. В подполе 1 наблюдается обратная корреляционная связь между  $\rho$  и  $H_d$ . Граничные значения, в пределах которых установлено влияние геологического признака на формирование  $\rho$ , составляют от 0 до 20 м. Это свидетельствует о том, что при глубине залегания кровли зоны дробления до 20 м наблюдается влияние данного показателя на  $\rho$ . При глубине более 20 м выявить влияние не удалось. Подполе 2, где корреляция отсутствует, использоваться далее не будет.

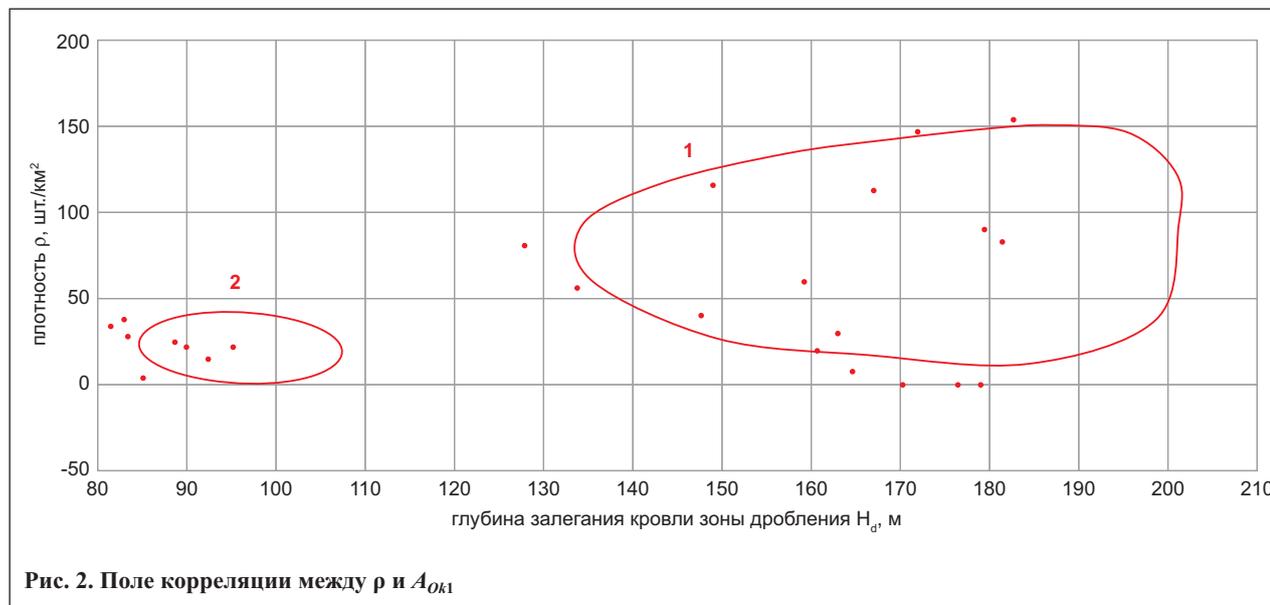


Рис. 2. Поле корреляции между  $\rho$  и  $A_{ок1}$

3. Формирование выборочных совокупностей, которые можно использовать при математическом моделировании. Практически эта задача реализуется следующим образом: экспериментальные данные, которые находятся за пределами граничных значений, исключаются, а из оставшихся данных формируется выборочная совокупность. Исходя из информации, приведенной на рис. 1, в формировании выборочной совокупности  $H_d$  использовали данные, не превышающие 20 м.

На основании диаграмм рассеивания был произведен **выбор геологических признаков**,

оказывающих наибольшее влияние на формирование карстовых воронок. Определяли граничные значения геологических признаков, в пределах которых влияние является наибольшим (табл. 2).

С учетом полученных результатов была составлена матрица исходных данных для дальнейших математических расчетов.

Следует отметить, что в вышеизложенном подходе решение об отбраковке геологических признаков основывается на субъективном подходе исследователя. Этот метод часто работает достаточно надежно, но в некоторых случаях, когда нет четкой взаимосвязи между исследуемыми признаками, он дает сбой.

Авторами был использован корреляционный метод, рассчитаны коэффициенты парной корреляции  $r$  между  $\rho$  и каждым геологическим признаком.

Расчетные ( $r_p$ ) коэффициенты корреляции сравнивали с табличными ( $r_m$ ). Те геологические признаки, которые имели  $r_p < r_m$ , исключали (выбраковывали) из дальнейших исследований. После чего оставшиеся геологические признаки ранжировали по убыванию  $r_p$ .

Влияние исследуемых геологических признаков на  $\rho$  оценивали с помощью вычисления коэф-

Таблица 2

Граничные значения геологических признаков		
Геологические признаки	Граничные значения	
	от	до
$H_k$ , м	0	15
$H_{к1}$ , м	9	40
$H_d$ , м	0	17
$H_{d1}$ , м	0	20
$M_{a1}$ , м	0	10
$M_s$ , м	0	13

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции между признаками							
Геологический признак	$\rho$	$H_k$	$H_{к1}$	$H_d$	$H_{d1}$	$M_{a1}$	$M_s$
$\rho$	1,00	-0,52*	-0,41	-0,50*	-0,44*	-0,54*	-0,29
$H_k$	-	1,00	0,71*	0,97*	0,96*	0,17	0,90*
$H_{к1}$	-	-	1,00	0,73*	0,80*	0,20	0,57*
$H_d$	-	-	-	1,00	0,98*	0,25	0,84*
$H_{d1}$	-	-	-	-	1,00	0,17	0,86
$M_{a1}$	-	-	-	-	-	1,00	-0,26
$M_s$	-	-	-	-	-	-	1,00

\* Значимый коэффициент корреляции составляет 0,44.

фициента корреляции  $r$ . Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Корреляционный анализ показал, что наибольшее влияние на  $\rho$  оказывают:  $M_{al}$  ( $r = -0,54$ ),  $H_k$  ( $r = -0,52$ ) и  $H_d$  ( $r = -0,50$ ). Другие геологические признаки не имеют статистически значимых связей с  $\rho$ .

Рассмотрим, *какими геологическими процессами обусловлено наличие или отсутствие значимых корреляционных связей между  $\rho$  и исследуемыми геологическими признаками.*

В классическом виде карстовые провалы (воронки) на земной поверхности формируются в два этапа. На **первом этапе** происходит образование карстовых полостей в грунтовом массиве. Необходимым условием для этого являются наличие карстующихся грунтов и агрессивной к ним жидкости и движение (разгрузка) этой жидкости. На **втором этапе** происходит деформация кровли карстовых полостей с образованием на земной поверхности карстовых воронок.

Рассмотрим *влияние исследуемых геологических признаков на формирование карстовых воронок.*

1. *Мощность аллювиальных отложений  $M_{al}$  ( $r = -0,54$ ).* Четвертичные отложения представлены суглинками. Действительно, питание водоносных горизонтов осуществляется, в частности, и за счет инфильтрационных вод. Поэтому чем мощнее пачка глинистых грунтов, перекрывающих карстующиеся породы, тем меньше вероятность образования карстовых полостей в грунтовом массиве и, как следствие, тем меньше вероятность формирования карстовых воронок на земной поверхности. В нашем случае установлено влияние  $M_{al}$  на  $\rho$  при мощности аллювиальных отложений до 10 м.

2. *Глубина залегания карстующихся грунтов  $H_k$  ( $r = -0,52$ ).* Геологический смысл этого признака заключается в том, что чем глубже залегают карстующиеся грунты, тем меньше вероятность появления карстовых воронок на земной поверхности. В рассматриваемом случае при глубине залегания карстующихся грунтов до 15 м этот признак влияет на формирование карстовых воронок, а при  $H_k > 15$  м такое влияние установить не удалось.

3. *Глубина залегания кровли зоны дробления  $H_d$  ( $r = -0,50$ ).* Под зоной дробления здесь понимается часть геологического тела, сформированного за счет обрушения карстовых полостей. Отсюда, чем выше к земной поверхности расположена кровля зоны дробления, тем большее влияние она оказывает на формирование карстовых воронок. В данных геологических условиях при глубине залегания кровли зоны дробления  $H_d$  до 17 м этот признак оказывает влияние на образование карстовых воронок, а при  $H_d > 17$  м такое влияние установить не удалось (см. рис. 1).

*Другие геологические признаки* оказывают меньшее влияние на формирование карстовых воронок. Например, такой геологический при-

знак, как мощность карбонатно-терригенных отложений соликамского горизонта ( $M_s$ ), статистически не связан с критерием  $\rho$ , о чем свидетельствуют незначимые коэффициенты корреляции ( $r = -0,29$ ). С геологической точки зрения это обусловлено тем, что данный горизонт залегает на глубинах от 70 до 150 м. Карстовые полости, которые находятся в этом горизонте, не проецируются на земную поверхность, поэтому не удалось установить степень влияния  $M_s$  на  $\rho$ .

С помощью значений коэффициентов корреляции было выполнено уточнение и ранжирование ведущих геологических признаков, оказывающих влияние на формирование карстовых воронок на земной поверхности. Эти геологические признаки не противоречат теории формирования карстовых провалов (воронок).

### Разработка математической модели

Для прогноза значений показателя  $\rho$  использовался *пошаговый многомерный регрессионный анализ*. Результаты расчетов можно представить в виде уравнения множественной регрессии, где в качестве результативного признака выступает показатель  $\rho$ , а в качестве факторных — геологические признаки:

$$\rho_m = 124,82 - 0,47M_{al} - 0,44H_k, \quad (4)$$

при коэффициенте множественной корреляции  $R = 0,70$ .

При расчете на первом шаге в модель был включен такой геологический признак, как мощность аллювиальных отложений  $M_{al}$ . Коэффициент множественной корреляции  $R$  составил 0,54. На втором шаге был включен показатель, характеризующий глубину залегания кровли карстующихся грунтов  $H_k$  при  $R = 0,70$ .

Как видно из уравнения регрессии (4), в него вошли не все используемые показатели, а только наиболее информативные.

*Проверка адекватности полученной математической модели* была выполнена путем сопоставления средних значений  $\rho$  для выборок, полученных экспериментальным путем и вычисленных по уравнению регрессии. Сущность этого подхода сводится к тому, что если средние значения близки между собой и  $t_p < t_m$ , то уравнением регрессии можно пользоваться на практике. Близость средних значений оценивается критерием Стьюдента  $t$ .

Результаты вычислений показали, что расчетное значение критерия Стьюдента  $t_p$  при  $\alpha = 0,05$  составляет 0,41, а табличное  $t_m$  равно 2,05, т.е.  $t_p < t_m$ , поэтому полученную математическую модель можно использовать при прогнозе значений  $\rho$  в тех подобластях, где отсутствуют экспериментальные данные. На основе полученного уравнения связи была произведена оценка плотности карстовых воронок  $\rho$  в тех подобластях, где она не была определена экспериментальным методом.



Таблица 4

Теоретические значения плотности карстовых воронок ( $\rho$ ) и интенсивности образования карстовых провалов ( $\lambda$ )				
№ подобласти	Значения геологических признаков, м		$\rho$	$\lambda$
	$M_{al}$	$H_k$		
25	1,4	3,1	123	1,23
26	2,2	4,1	122	1,22
27	1,8	3,5	122	1,22
28	2,8	6,7	120	1,20
29	3,1	4,5	121	1,21
30	1,9	3,5	122	1,22

На основании  $\rho$  была рассчитана интенсивность образования карстовых провалов с учетом периода их образования для исследуемой территории (100 лет). По величине интенсивности образования карстовых провалов была определена категория устойчивости данной территории (табл. 4). Было установлено, что изучаемые подобласти (25–30) относятся к I категории, т.е. являются очень неустойчивыми территориями (см. табл. 1), на которых не рекомендуется строительство зданий и сооружений.

## Выводы

1. Разработана математическая модель прогноза значений классификационного показателя карстовой опасности для тех подобластей (точек исследования), где он не может быть получен экспериментальным путем.

2. Предлагаемый способ прогноза апробирован при оценке плотности карстовых воронок на территории с развитым сульфатным карстом. Получены положительные результаты, что дает основания рекомендовать его для инженерно-геологического районирования территорий. 

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарик Г.К., Пендин В.В. Методика количественной оценки инженерно-геологических условий и специального инженерно-геологического районирования // Инженерная геология. 1982. № 4. С. 82–89.
2. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: Изд-во ОАО «ПНИИИС», 2009. 236 с.
3. Середин В.В., Пушкарева М.В., Лейбович Л.О., Бахарева Н.С. Методика инженерно-геологического районирования на основе балльной оценки классификационного признака // Инженерная геология. 2011. № 3. С. 20–25.
4. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 2: Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: Госстрой России, 2000.

# ГЕОТЕХНИКА

Международный журнал для изыскателей, проектировщиков и строителей

Цель журнала — знакомство российских специалистов с передовым отечественным и зарубежным опытом в области геотехники

Периодичность в 2012 году:

**6 номеров**

Стоимость годовой подписки:

**3900 рублей**

[info@geomark.ru](mailto:info@geomark.ru)



Журнал «Инженерная геология»

стал одним из наиболее востребованных печатных изданий в нашем профессиональном сообществе. Сотрудники редакции постоянно работают над дальнейшим повышением качества журнала. Все статьи проходят рецензирование членами редакционной коллегии и внешними рецензентами, научное и литературное редактирование. Вы, читатели, можете внести свой вклад в развитие журнала, присылая в редакцию свои статьи, подписываясь на «Инженерную геологию».

Тел./факс: +7 (495) 366-2684, 366-2095  
E-mail: [geg@pniiis.ru](mailto:geg@pniiis.ru)

Реклама